

УДК 621.3.01:537.212

Щерба Максим Анатолійович, канд. техн. наук, наук. співроб.

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, Київ, Україна, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, +380444542460, m.shcherba@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ПОНДЕРОМОТОРНИХ СИЛ ВПЛИВУ ВОДНИХ МІКРОВКЛЮЧЕНЬ І ТРИЙНГІВ НА ТВЕРДУ ІЗОЛЯЦІЮ У ЗМІННОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Проведено математичне моделювання пондеромоторних сил впливу водних мікрровключень і трийнгів на тверду ізоляцію у змінному електричному полі. Встановлено закономірності зміння цих сил від матеріалу та конфігурації мікрровключень і трийнгів: їхніх форм, взаємних відстаней, довжини та розгалуженості трийнгів, розташування їхніх віток відносно центральної та зовнішнього поля. Визначено найбільш небезпечні детерміновані та стохастичні сили деградації твердого діелектрика у зовнішньому електричному полі.

Ключові слова: змінне електричне поле, тверда ізоляція, підсилення, пондеромоторні сили, провідне мікрровключення, водний трийнг.

Щерба Максим Анатольевич, канд. техн. наук, науч. сотр.

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, +380444542460, m.shcherba@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНЫХ СИЛ ВЛИЯНИЯ ВОДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ И ТРИИНГОВ НА ТВЕРДУЮ ИЗОЛЯЦИЮ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Проведено математическое моделирование пондеромоторных сил влияния водных микровключений и триингов на твердую изоляцию в переменном электрическом поле. Установлены закономерности изменения этих сил от материала и конфигурации микровключений и триингов: их форм, взаимных расстояний, длины и разветвленности триингов, расположения их веток относительно центральной и внешнего поля. Определены наиболее опасные детерминированные и стохастические силы деградации твердого диэлектрика во внешнем электрическом поле.

Ключевые слова: переменное электрическое поле, твердая изоляция, усиление, пондеромоторные силы, проводящие микровключения, водный триинг.

Shcherba Maksym Anatoliyovich, PhD, Research scientist

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, prospect Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, +380444542460, m.shcherba@gmail.com

MODELING PONDEROMOTIVE FORCES OF WATER TREE AND MICROINCLUSIONS INFLUENCE ON SOLID INSULATION IN AN ALTERNATING ELECTRIC FIELD

Mathematical modeling of the ponderomotive forces influence of water micro-inclusions and micro-trees on the solid insulation in an alternating electric field has been made. The regularities of the force change depending on the material and configuration of micro-inclusions and trees: their forms, mutual distances, length and tree branching, their location relative to the central branch and the external field have been defined. The most dangerous deterministic and stochastic degradation forces of solid dielectric in an external electric field have been determined.

Key words: alternating electric field, solid insulation, intensification, ponderomotive forces, conducting micro-inclusions, water tree.

Введение

В электрическом поле (ЭП) на проводящее включение в твердой изоляции действуют пондеромоторные (электрические) силы, определяемые взаимодействием поля с зарядами, индуцированными на поверхности включения. В однородном ЭП на положительные и отрицательные заряды, наведенные на поверхности проводящего включения, действуют противоположные силы, направленные на его вытягивание и изменение ориентации вдоль силовых линий поля. В переменном ЭП эти силы изменяются с удвоенной частотой поля. Но общий заряд включения равен нулю, разноименные заряды на его поверхности распределяются симметрично и действующая суммарная сила, способная смещать включение, равна нулю. В неоднородном поле разноименные заряды на поверхности включения распределены несимметрично, поэтому кроме сил, направленных на ориентацию и вытягивание включения вдоль поля, возникает результирующая пондеромоторная сила, способная втягивать включение в локальные области сильных полей. Силовые воздействия проводящих включений на структуру твердого диэлектрика могут возрастать в десятки раз

при изменении их электрических характеристик, размеров, формы и взаимного расположения [1].

Длительное время в исследованиях электрофизических механизмов деградации твердой электроизоляции не учитывалось влияние возмущенного ЭП на особенности изменения плотности зарядов, индуцируемых на поверхностях микровключений с различными свойствами, формами и взаимным расположением. Но их анализ важен для определения закономерностей возникновения и развития в полимерной изоляции таких пороговых электрофизических процессов, как образование водных и электрических триингов [2]. Особенно важно учитывать дополнительное усиление ЭП в диэлектрике возле близко расположенных микровключений, расстояния между которыми меньше их размеров. Размеры таких включений могут быть много меньше допустимых, но поле в изоляции между ними может усиливаться в десятки раз. Исследования последних лет показывают, что даже высококачественная современная высоковольтная полимерная изоляция интенсивно деградирует в сильно возмущенных ЭП, особенно при появлении в ней локальных областей с плотно расположенными водными микровключениями, триингами и газовыми полостями [1–9].

Учитывая сложность решения задач такого класса, в работе применялись методы численного моделирования, которые реализованы в пакете прикладных программ Comsol Multiphysics [1–5]. При анализе пондеромоторных сил в структуре твердой изоляции, учитывались электрические свойства включений, их размеры, форма, взаимное расположение и особенности изменения плотности зарядов на их поверхностях.

Целью работы являлось определение особенностей локального возмущения переменного электрического поля в высоковольтной твердой полимерной изоляции и закономерностей увеличения в ней пондеромоторных сил при изменении характеристик плотно расположенных водных микровключений, триингов и газовых полостей.

Физико-математическая постановка задачи (как и в работах [1–5]) формулировалась в квазиэлектростатическом приближении для неферромагнитного, линейного и изотропного диэлектрика во внешнем низкочастотном электрическом поле. Взаимосвязь параметров электромагнитного поля описывалась системой уравнений Максвелла [10], функции в которых записывались в комплексном виде для избавления их от временной зависимости:

$$\operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{J}}_{\text{полн}}, \quad \operatorname{rot} \dot{\mathbf{E}} = -i\omega \dot{\mathbf{B}}, \quad (1, 2)$$

$$\operatorname{div} \dot{\mathbf{B}} = 0, \quad \operatorname{div} \dot{\mathbf{D}} = \rho. \quad (3, 4)$$

Эффектом запаздывания процессов пренебрегалось. Фаза поля во всех точках среды принималась одинаковой. Допускалось, что внешнее ЭП безвихревое и для него можно ввести скалярный электрический потенциал $\dot{\phi}$, для которого выполняется уравнение:

$$\dot{\mathbf{E}} = -\operatorname{grad} \dot{\phi}. \quad (6)$$

Расчетное уравнение для потенциала $\dot{\phi}$ имеет вид:

$$\operatorname{div} [-(\gamma + i\omega\epsilon_0 \dot{\epsilon}) \operatorname{grad} \dot{\phi}] = 0. \quad (7)$$

Так называемый напряженный объем диэлектрика V_n в котором напряженность поля E больше допустимой для данной изоляции значения $E_{\text{доп}}$ (т. е. $E > E_{\text{доп}}$), как и в работах [1, 2], для трехмерной расчетной модели определялся согласно формуле:

$$V_n = \int_V f(E) dV; \quad (8)$$

где V – расчетный объем диэлектрика;

$f(E)$ – функция, которая при $E \geq E_{\text{доп}}$ принимает значение $f(E) = 1$, а при $E < E_{\text{доп}}$ – $f(E) = 0$.

Расчет возмущений ЭП в диэлектрике с водными микротриингами различной конфигурации проводился с использованием численного метода конечных элементов.

Условия на границе раздела проводник-диэлектрик (т. е. на границе среда-включение с триингом) определялись для потенциалов $\dot{\phi}_1$ и $\dot{\phi}_2$ и их производных по направлению нормали к поверхности раздела сред:

$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_2, \quad (\gamma_1 + i\omega\epsilon_0\epsilon_1) \partial \dot{\phi}_1 / \partial n = (\gamma_2 + i\omega\epsilon_0\epsilon_2) \partial \dot{\phi}_2 / \partial n. \quad (9, 10)$$

Для получения единственного решения уравнения (7) на верхней и нижней поверхностях расчетной области дополнительно задавались условия Дирихле (значения потенциалов), а на боковых поверхностях - условия Неймана (согласно которым производная потенциалов по нормали к поверхности равна нулю, что соответствует отсутствию токов в этих направлениях).

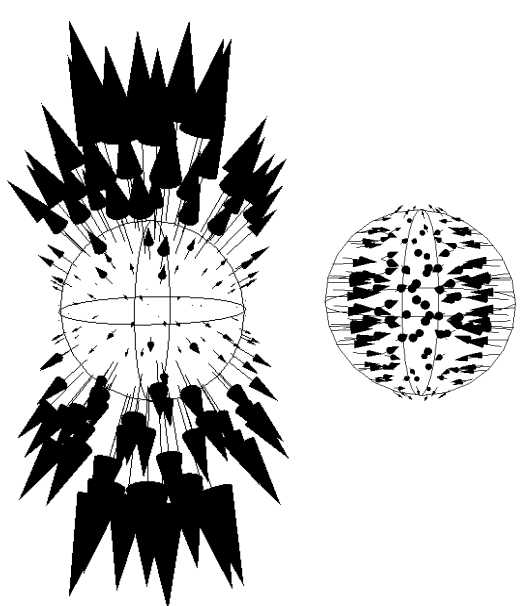
Для анализа закономерностей изменения силовых взаимодействий внешнего ЭП с зарядами на поверхности включений использован электрический тензор напряжений Максвелла \mathbf{T} как и в работе [10]. Для нахождения электрической силы \mathbf{F} , действующей на объемный элемент включения dv со стороны поля, нужно вычислить объемную плотность силы $\mathbf{f} = \rho \mathbf{E}$ и проинтегрировать ее по объему dv . Но в работе [10] обосновано, что силовое воздействие ЭП на проводящее включение можно считать результатом только сил, приложенных к поверхности включения. Поэтому для определения силы \mathbf{F} вместо объемного интеграла использовался поверхностный интеграл от тензора напряжений \mathbf{T} , согласно выражению:

$$\mathbf{F} = \iiint \mathbf{f} dv = \iint \mathbf{T} ds. \quad (11)$$

При этом составляющие объемной силы \mathbf{f} по координатным осям можно записать через компоненты векторов поля [10]. Например, для f_x компоненты получим выражение:

$$f_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\epsilon}{2} (E_x^2 - E_y^2 + E_z^2) \right] + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon E_x E_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon E_x E_z). \quad (12)$$

Уравнение (13) для компонент тензора \mathbf{T} имеет вид:



$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yz} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\epsilon}{2} (E_x^2 - E_y^2 - E_z^2) & \epsilon E_x E_y & \epsilon E_x E_z \\ \epsilon E_y E_x & \frac{\epsilon}{2} (E_y^2 - E_z^2 - E_x^2) & \epsilon E_y E_z \\ \epsilon E_z E_x & \epsilon E_z E_y & \frac{\epsilon}{2} (E_z^2 - E_y^2 - E_x^2) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Результаты численного эксперимента.

На модели выполнялся анализ пондеромоторных давлений и сил взаимодействия различных микровключений размерами от 25 до 100 мкм со сшитым полиэтиленом (СПЭ). Результаты расчета показали, что пондеромоторные давления, возникающие на поверхности водного микровключения (рис. 1 а), направлены в сторону внешней нормали и принимают наибольшие

Рис.1. Пондеромоторные силы, возникающие на поверхности: а) водного и б) воздушного микровключений в диэлектрике

значения (порядка 10^7 Па) на его полюсах вдоль внешнего поля. Давления, возникающие на поверхности воздушного включения (рис. 1 б), направлены в сторону внутренней нормали и принимают наибольшие значения порядка 10^6 Па на его полюсах перпендикулярно внешнему ЭП.

Результирующая сила как интеграл от возникающих давлений по поверхности включения равняется нулю, что соответствует компенсации сил в однородном ЭП. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами работы [2], что подтверждает адекватность математической модели и результатов численного эксперимента.

Моделировалось также неоднородное ЭП и возникающие пондеромоторные силы при близком расположении воздушных и водных микровключений различной конфигурации (формы и взаимного расположения).

На рис. 2 приведены результаты расчета распределения ЭП и электрических сил в СПЭ изоляции при наличии в ней: а) водной и воздушной сфер диаметрами 50 мкм; б) двух эллипсоидов с полуосями 50 и 100 мкм, вытянутых перпендикулярно ЭП; в) таких же эллипсоидов, но вытянутых вдоль ЭП; г) воздушного эллипсоида, вытянутого перпендикулярно, а водного – вдоль ЭП; д) воздушного эллипсоида и водной сферы с триингом на поверхности.

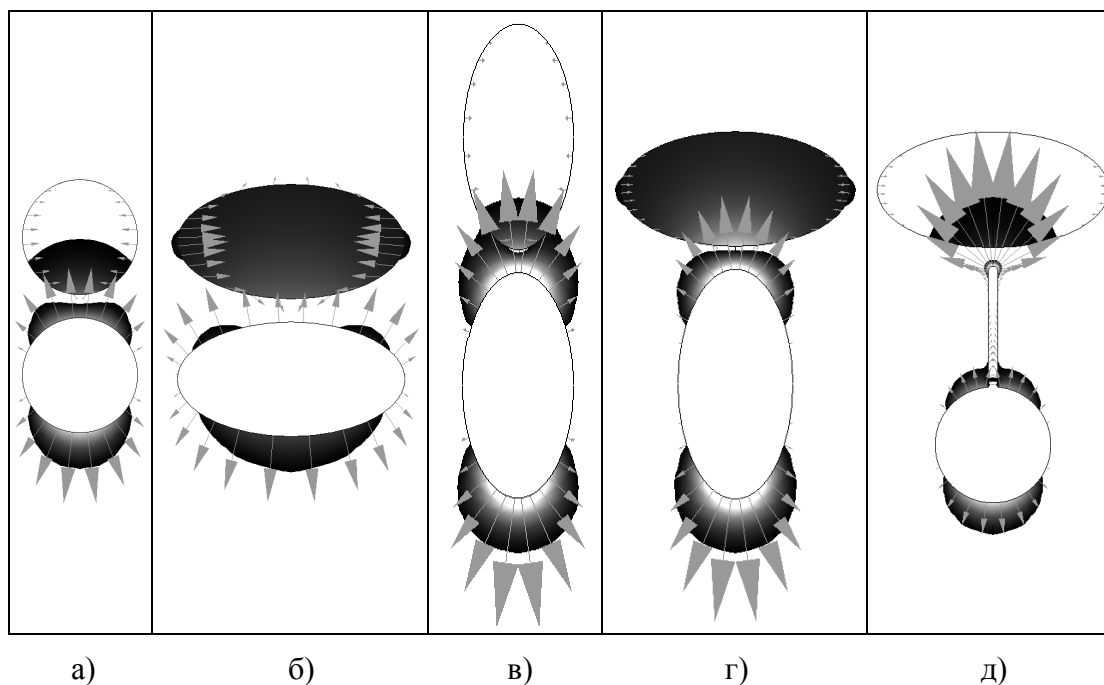


Рис. 2. Усиление ЭП и пондеромоторные силы в случаях водного и воздушного микровключения форм: а) сфер; б) эллипсоидов перпендикулярно ЭП; в) эллипсоидов вдоль ЭП; г) воздушного эллипсоида перпендикулярно, а водного – вдоль ЭП; д) воздушного эллипсоида и водной сферы с триингом на поверхности

Расстояния между всеми дефектами 10 мкм. Тонированные области соответствуют областям напряженного объема V_n , в котором напряженность ЭП усиливается на 50 % и более, а стрелки отражают величину и направление сил на поверхности включений.

В табл. 1 показано, что наибольшая напряженность ЭП $E_{\max}/E_0 = 2,8$ в воздушном включении возникает в случае г), т. е. при большой величине наведенного заряда на водном включении и большой площади близко расположенного к нему воздушного включения.

Таблица 1

Напряженность ЭП $E_{\max}/E_0 = 2,8$ в воздушном включении

	Случай а)	Случай б)	Случай в)	Случай г)	Случай д)
E_{\max}/E_0 воздуха	2,0	1,9	2,4	2,8	1,8
E_{\max}/E_0 изоляции	2,7	1,8	4,9	4,8	5,7
V_n воздуха, 10^{-14} м^3	0,82	26,2	0,76	26,2	3,26
V_n изоляции, 10^{-14} м^3	2,7	3,1	9,2	7,2	2,8
p_n воздуха, 10^6 Па	1,45	1,92	1,89	1,87	1,7
p_n воды верх, 10^6 Па	6,2	2,0	15,7	11,3	27
p_n воды низ, 10^6 Па	4,4	2,6	20,0	19,1	6,5
F_z воздуха	5,8	17,1	8,7	22,0	3,1
F_z воды	- 5,8	- 17,1	- 8,7	- 22	- 3,1

Максимальная напряженность ЭП $E_{\max}/E_0 = 5,7$ возникает в случае д), т. е. у острия триинга. Значение E_{\max}/E_0 в воздушном включении также возникает в случае д) при расстоянии между включениями, меньшем 5 мкм, но напряженный объем будет меньше объема включения. Его наибольшее значение $V_n = 26,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$ будет в случаях б) и д), в которых оно равно объему воздушного включения. Наибольшее на него давление $p_n \text{ воздуха} = 1,9 \cdot 10^6 \text{ Па}$ возникает в случае в), но в остальных случаях оно почти такое же. Это подтверждает, что величина $p_n \text{ воздуха}$ в основном зависит от параметров воздушного включения, а не параметров близко расположенного к нему водного включения.

Наибольший напряженный объем диэлектрика $V_n = 9,2 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3$ возле водного включения возникает в случае в) – при наименьшем ослаблении ЭП воздушным включением. Наибольшее давление поверхности водного включения $p_n \text{ воды} = 2,7 \cdot 10^7 \text{ Па}$ на изоляцию возникает в случае д), т.е. возле острия водного триинга. Удлинение триинга может увеличить давление на изоляцию еще на порядок и более – оно в 10–30 раз может быть больше, чем величина $p_n \text{ воздуха}$.

Наибольшая сила F_z отталкивания зарядов близко расположенных водного и воздушного включений возникает в случае г) – при наибольшем взаимодействии поверхностных зарядов.

На рис. 3 показаны электрические силы на остриях водных триингов разных длин и ветвей, образованных на водном включении диаметром 50 мкм.

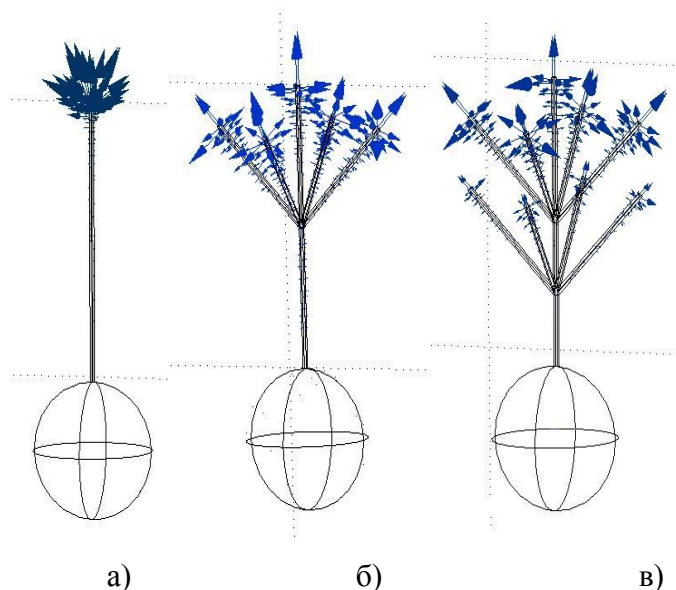


Рис. 3. Электрические силы у острия водного триинга разной разветвленности: а) одна; б) пять и в) девять

Радиус центрального канала триинга равнялся 1 мкм, а длина ветвей изменялась от 10 до 100 мкм. Стрелками обозначены направление и величина сил воздействия острия каждого канала триинга на изоляцию: случай а) соответствует наличию триинга без ветвей, б) – с пятью ветвями, а в) – с девятью ветвями.

На рис. 4 представлены результаты численного расчета локальных усилений ЭП в СПЭ изоляции при наличии в ней двух близко расположенных вдоль поля водных микровключений с сильно разветвленными триингами (по 17 ветвей в каждом триинге).

На рис. 4 а показаны тонированные области, соответствующие напряженному объему изоляции, а на рис. 4 б стрелками отражены направления и величина векторов электрических сил. У острия центрального канала триингов возникают области наибольшей напряженности ЭП в изоляции и наибольшего давления на нее поверхности водяного включения ($p_{n \text{ воды}} = 5 \cdot 10^7$ Па). При высокой степени разветвленности у каждого острия боковых ветвей триингов также возникают большие давления на изоляцию ($p_{n \text{ воды}} = 10^7$ Па), что увеличивает суммарное количество интенсивно деградирующих ее областей.

Выводы

1. Выявлены закономерности усиления низкочастотного электрического поля в твердой изоляции с водными и воздушными (одиночными и близко расположенными) микровключениями различных форм и увеличения пондеромоторных (электрических) сил и давлений поверхностей включений на структуру изоляции. Показано, что электрические давления поверхности водных включений на изоляцию может составлять 10 МПа и более, что больше, чем на порядок, превышает давление, возникающее в воздушных включениях.

2. Подтверждено, что наибольшие локальные усиления электрического поля, электрические давления и силы в изоляции возникают при появлении в ней проводящих включений, вытянутых и близко расположенных вдоль поля. Возникновение на поверхности таких включений водных триингов, прорастающих в изоляцию между ними, может дополнительно усилить в ней электрическое поле и увеличить давление более, чем на порядок.

3. При возникновении в изоляции близко расположенных водного и воздушного микровключений наибольший напряженный объем диэлектрика возникает возле водного включения возникает в случае наименьшего ослабления поля воздушным включением, а наибольшее давление возникает все равно у острия водного триинга.

Список использованной литературы

1. Щерба М. А. Возмущение электрического поля проводящими включениями в диэлектриках. – К.: Наш формат, 2013. – 224 с.
2. Шидловский А. К., Щерба А. А., Золотарев В. М., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Наш формат, 2013. – 550 с.

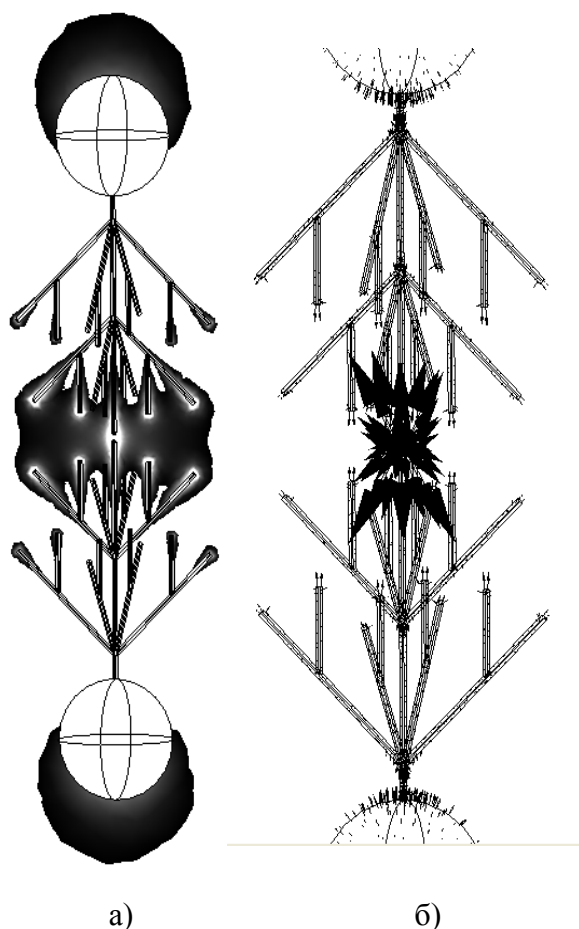


Рис.4. Распределение ЭП и векторы электрических сил при наличии на двух близко расположенных водных включениях триингов разветвленных триингов

3. Щерба М. А. Влияние характерных размеров проводящих включений на возмущения электрического поля в диэлектрической среде. // Праці ІЕД НАН України. – 2011. – № 30. – С. 134–139.
4. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 9–15.
5. Щерба М. А. Влияние размерных параметров и конфигурации водных микровключений на распределение плотности электрических токов в диэлектрике Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – Спец. вып. – № 8 (114). – Т. 1. – С. 22–28.
6. Champion J. V., Dodd S. J. and Stevens G. C. Analysis and Modelling of Electrical Tree Growth in Synthetic Resins Over a Wide Range of Stressing Voltages // Appl. Phys. 1994. – Vol. 21. – P. 1020–1030.
7. Dissado L. A. Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory // IEEE Trans. on DEI, 2002. – Vol. 9. – P. 483–497.
8. Forster E. O. Progress in the Understanding of Electrical Breakdown in Condensed Matter // J. Phys., D: Appl. Phys. – 1990. – Vol. 23, P. 1506–1514.
9. Shimizu N. and Tanaka H. Effect of Liquid Impregnation on Electrical Tree Initiation in XLPE // IEEE Trans. DEI. – 2001. – Vol. 8. – P. 239–243.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1980. – 560 с.

References

1. Shcherba, M. A. (2013), *Electric field disturbtion by conducting inclusions in dielectrics* [Vozmushchenie elektricheskogo polya provodyashchimi vklyuchenyami v dielektrikah], Nash format, Kiev, 223 p.
2. Shidlovskiy, A. K., Shcherba, A. A., Zolotarev, V. M., Podoltsev, A. D., Kucheriavaya, I. N. (2013), *The ultra-high voltage polymer-insulated cables* [Kabeli s polimernoy izolyatsiey], Institut electrodynamiky NAN Ukrainy, Kiev, 550 p.
3. Shcherba, M. A. (2011), “Influence of characteristic sizes of conducting inclusions on electric field distortion in the dielectric medium” [Vliyanie harakternykh razmerov provodyashchih vklyucheniy na vozmushcheniya elektricheskogo polya v dielektricheskoy srede], *Pratsi Institutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, No 30, P. 134–139.
4. Shcherba, A.A., Podoltsev, A.D., Kucheriavaya, I.N. (2013), “Electromagnetic processes in the polyethylene insulated cable line for voltage 330 kV” [Elektromagnitnye protsesy v kabelnoy linii s polietilenovoy izolyatsiey na napryazhenie 330 kV], *Tekhnichna electrodynamika*, No. 1, P. 9–15.
5. Shcherba, M. A. (2013), “Influence of size parameters and configuration of water micro-inclusions on the distribution of density electrical currents in the dielectric” [Vliyanie razmernykh parametrov i konfiguratsii vodnykh mikrovklyucheniy na raspredelenie plotnosti elektricheskikh tokov v dielektrike] *Energoberezhenie, energetika, energoaudit*, Spetial issue, No 8 (114), V. 1, P. 22–28.
6. Champion, J. V., Dodd, S. J. and Stevens, G. C. (1994), “Analysis and Modelling of Electrical Tree Growth in Synthetic Resins Over a Wide Range of Stressing Voltages”, *Appl. Phys.*, V. 21, P. 1020–1030.
7. Dissado, L. A. (2002), “Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory”, *IEEE Trans. on DEI*, V. 9, P. 483–497.
8. Forster, E. O. (1990), “Progress in the Understanding of Electrical Breakdown in Condensed Matter”, *J. Phys., D: Appl. Phys*, V. 23, P. 1506–1514.
9. Shimizu, N. and Tanaka, H. (2001), “Effect of Liquid Impregnation on Electrical Tree Initiation in XLPE”, *IEEE Trans. DEI*, V. 8, P. 239–243.
10. Landau, L.D., Lifshits, E.M. (1980), *Electrodynamics of continuous media* [Elektrodinamika sploshnykh sred], Nauka, Moskva, 560 p.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.